農業氣象、空氣污染與酸雨對農業生產影響及因應措施
研討會論文專輯 9-31, 1996

臭氧光化污染之現況與控制策略建議

柳中明[1] [2]楊之遠
[1]台灣大學大氣科學系 [2]行政院環保署空保處

內 容

摘要 …… 10
英文摘要 …… 10
一、前言 …… 11
二、1993年7月～1994年12月近地面臭氧氣候統計分析 …… 13
三、嚴重污染個案分析 …… 16
四、討論與建議 …… 27
誌謝 …… 29
引用文獻 …… 29

臭氧光化污染之現況與控制策略建議

柳中明[1] [2]楊之遠

[1]台灣大學大氣科學系 [2]行政院環保署空保處

摘 要

台灣近地面臭氧光化污染問題，早已是不爭的事實。1993年7月環保署啓用66個新的空氣品質監測站，由於新站普遍離地12公尺以上，且距離道路至少20公尺，因此較過去測站更能反應大範圍臭氧光化污染的實況。本文分析1993年7月～1994年12月環保署資料，除一方面證實作者們所長期提出之「北部在夏季，中南部在秋季」爲臭氧光化污染最嚴重時期外，更發現高臭氧濃度不是僅出現在少數測站，而是大範圍地區的現象，如美濃山區、萬里濱海區均多次出現小時臭氧濃度超過國家標準120ppbv的狀態。我國臭氧光化污染最嚴重的測站是在屏東，1993年7月～1994年12月共出現134次小時臭氧濃度超過120ppbv的情形，1994年內約爲85次。本文另外分析5次嚴重污染個案時期之臭氧時空變化與大氣環流之相關。大致上，在適當的綜觀氣象環境狀態下，譬如颱風接近時，其前緣之下沈氣流與地形阻隔作用，會促使台灣不同區域出現光化污染狀況。未來更深入的分析研究，將有助於事前之污染預報掌握。本文最後對台灣整體性之光化污染研究與控制策略擬定，提出全盤性之規劃建議，希望提供相關機構與學者之參考。

關鍵詞：臭氧光化污染、整體規劃

The State of Ozone Pollution and the Control Strategy

Chung-Ming Liu[1] and Chea-Yuan Young[2] ([1]·Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University and [2]·Bureau of Air Quality Protection and Noise Control, EPA)

Abstract: There is no dispute about the severe ozone pollution problem in Taiwan. In this paper, we have analyzed the air-quality data collected by the Environmental Protection Administration (EPA) of the Executive Yuan during July 1993-December 1994. These stations are all located at altitudes at least 12m above the ground and 20m away from the major traffic. Hence, these stations are suitable to monitor the ambient air-quality condition. In short, we noted that the most suitable season for the occurrence of the ozone episodes was in summer over the northern area and in autumn over the mid-and southern regions. Also, it is confirmed about the wide-spreaded high ozone level all over most of the western Taiwan. Episodes were even observed at the mountain site MeiLoon and the sea-short site WanLi. The station

with the most frequent occurrence of the hourly-ozone concentration exceeding the national standard of 120ppbv was at Ping Tung, I.E. 134 times during July 1993 December 1994 and 85 times in 1994. We have also explored the temporal and spatial variation of the ozone concentration and the wind field during five selected ozone episodes. In all, Favorable synoptic condition was veryy important to the occurrence of ozone episoses. For instance, during a period of typhoon approaching, the downdraft at front accompanying with the terrain blocking effect could create suitable condition for a significant ozone production and accumulation over a certain part of Taiwan. Further research is needed to use such knowledge to the prediction of episode. In this paper, we have also outlined in detail an overall study plan for the ozone pollution and control strategies research.

Key words: Ozone pollution, Overall planning.

一、前 言

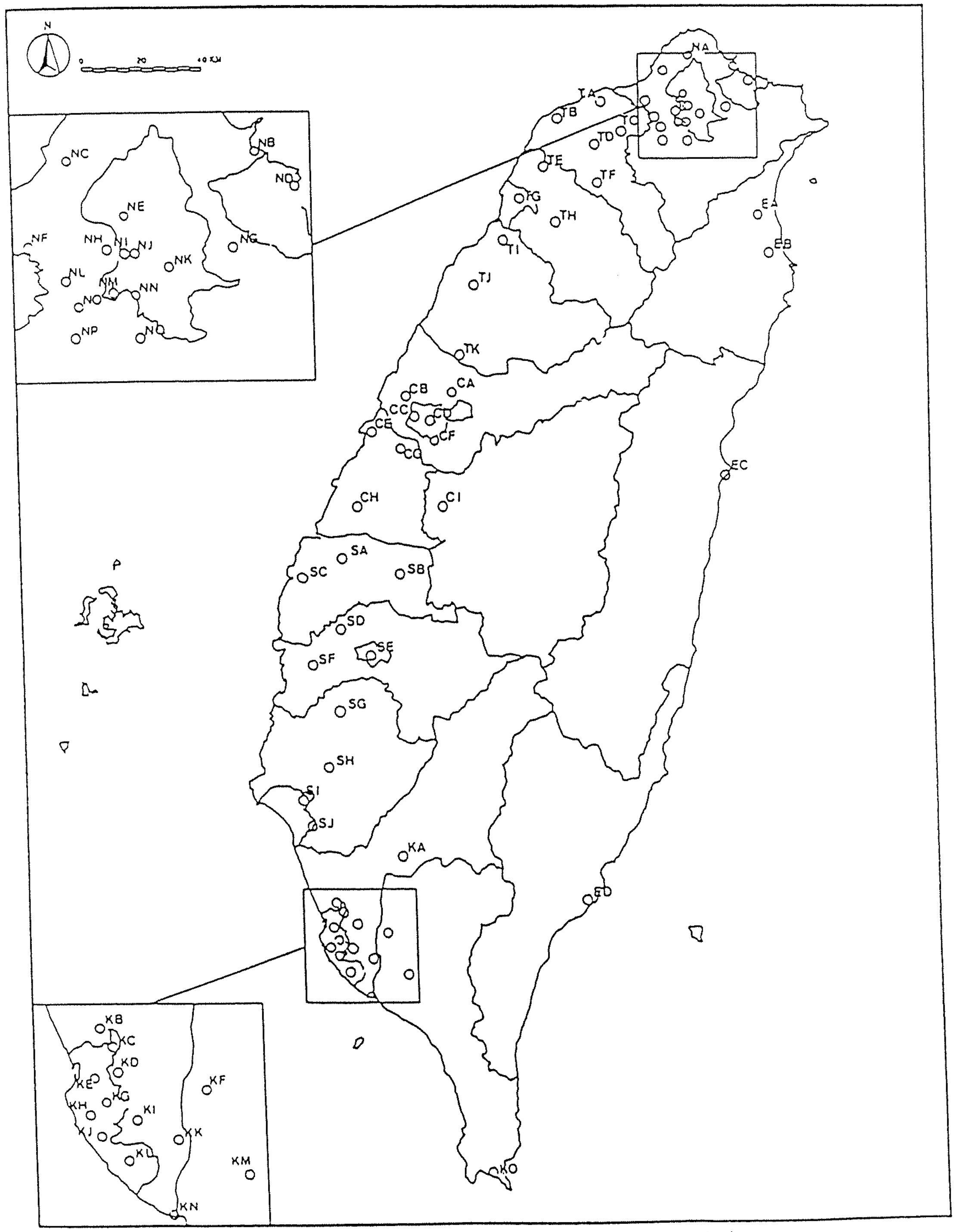
自1950年以來，光化煙霧污染已成爲世界性的困擾（Seinfeld, 1989）。汽機車數量大幅度成長，所排放之氮氧化合物（NOx）與揮發性有機物質（VOC; Volatile Organic Compounds），在充分的光化反應機制下會形成臭氧等二次污染物（柳與盧，1991），並在適當的氣象環境下，迅速累積，造成對人體健康不適的環境（Liu et al., 1994a）。

台灣的臭氧光化污染問題，早已是不爭的事實（柳，1993a）。Liu and Young（1995）嘗分析1988～1993年間，行政院環境保護署的19個空氣品質監測站資料。這些測站由於位於近地面，且靠近交通要道，因此均測量到高濃度的一氧化碳（CO），以及柴油車所排放之二氧化硫（SO_2），當然氮氧化合物（$NOx = NO + NO_2$）的濃度亦相當高。所以這19個測站適合歸類於近似交通測站。不過，1988～1993年間板橋站仍曾出現15～32次臭氧小時平均濃度超越國家標準120ppbv的狀況，而七賢站更在 1989年出現54次超越國家標準的情形。小時平均臭氧濃度，最高在板橋站與中壢站曾達230 ppbv，在楠梓站與七賢站曾達200ppbv，以上可見台灣臭氧光化污染嚴重的情形。

大略上，由於北部較南部之汽機車數量多，所以NO濃度高，但臭氧濃度卻有由北往南遞減的現象。同時，由於氣候狀態的變動，北部在夏季，南部在春、秋季，易出現高污染狀況。另外，Liu and Young（1995）更指出，由於汽機車數量持續上升，多數測站在1988～1993年間，均測量到NO濃度持續上升，但是O_3濃度出現前三年上升，後三年下降的現象。換言之，這些測站太接近地面，臭氧未經充分時間生成與累積，就無法在這些測站資料中顯現出我國汽機車數量持續增加的效應。

1993年7月環保署大幅更換空氣品質監測站，由原來的19個測站增加爲66個測站（圖一），柳與李（1994）特別指出新站普遍離地12公尺以上且距離道路至少20公尺，比舊站至少高約3公尺且遠離道路16公尺。因此新站所測CO僅爲舊站的0.4～0.8倍，NO僅爲舊站0.25～0.8倍，均顯示遠離交通污染源的特性。另外，NO_2約爲舊站的0.6～1.4倍，並未明顯改變；O_3卻爲舊站的1.2～2倍。後二者特性的改變，就顯示新站較舊站更適合測量充分光化反應後的大氣臭氧濃度，因此新站應可歸類爲城市環境大氣之一般測站。柳與李（1994）進一步指出，更新測站後，台灣地區的主要指標污染物雖然仍是懸浮微粒，但是臭氧成爲指標污染物之比例卻明顯增加，在各測站出現之

比例約在10％～50％間。換言之，目前的新站，已可充分反應我國汽機車數量長期成長下，大環境光化煙霧污染惡化之狀態。



圖一：環保署66個空氣品質監測站位置圖，代號請查表一

本文延續過去的研究，主要使用1993年7月～1994年12月的66個環保署測站資料，以分析臭氧光化污染特性是否與過去舊站的表現有所不同；其次選擇不同季節下具代表性之嚴重個案，分析當時的臭氧濃度分佈情形；最後提出未來應加强之研究重點建議。

二、1993年7月～1994年12月近地面臭氧氣候統計分析

2.1 臭氧光化污染現象

表一詳列出66個測站在1993年7-12月與1994年1-12月間所測量到之小時平均臭氧濃度超過120ppbv的次數，以及季節分佈情形。120ppbv爲我國國家標準所允許之最高小時平均濃度，超越此標準的次數越多，就表示當地之臭氧光化現象愈惡化。同表亦列出各站所曾測量到之最大臭氧濃度。

北部地區以土城所測到之43次超過標準爲最嚴重，其次爲萬里35次，新店29次，萬華25次，松山25次，板橋24次，古亭22次等。最大臭氧濃度出現在土城（216 ppbv）、新店（207ppbv）與古亭（200 ppbv），萬里亦嘗出現159ppbv的高濃度，以上足以說明北部地區臭氧光化污染的嚴重性。值得注意的是，除萬里站外，這些超過標準20次以上的測站都是位於台北盆地內淡水河流域與基隆河流域的下游，且靠近林口台地與中央山脈的交會處。顯然是受區域氣流影響，所以高光化污染現象集中在這個地區（柳與蘇，1995a）。表一顯示多數污染事件都是出現在夏季。另外，萬里測站亦是在夏季多出現污染事件，當地爲濱海沙灘，污染物應是由其他地區傳送而來。比較可能的過程爲：台北盆地大量之臭氧先驅污染物NOx與VOC受陸風傳送至海峽上，再受西南季風與白日海風輸送至北方濱海地區，同時光化反應持續進行，而至高臭氧污染狀況出現在萬里站。由於海洋面上資料缺乏，要正確證明上述現象，必須進行飛航測量。

桃竹苗區以龍潭19次，苗栗18次與三義12次較爲嚴重，最高濃度在龍潭曾達153 ppbv，次爲苗栗148ppbv，多數站也都曾出現超過120ppbv的情形。另外，春、夏與秋季都易出現高污染狀況，其與氣象環流間之關係，未來須詳細探究，才能釐清。

中部地區以南投26次，豐原22次，最爲突出。最高濃度在南投曾達156ppbv，忠明148ppbv，豐原140ppbv等。以秋季出現高污染狀況最爲頻繁。

雲嘉南區以後甲出現12次小時平均臭氧濃度超過120ppbv爲最多，最高濃度約160ppbv，且主要出現在秋季。似乎雲嘉南區目前的臭氧污染狀況較西部平原上其他地區爲最佳。不過，仍然是多數測站均曾出現小時臭氧濃度超過120ppbv的情形。

高屏地區大概是我國臭氧光化污染最嚴重的地區，屏東站共出現134次超過標準的狀況，1994年就出現85次。其次爲左營69次，林園68次，潮州與橋頭各38次等。最高濃度在林園曾達210ppbv，屏東207 ppbv，甚至台灣南端的恆春站亦曾出現178 ppbv的高濃度。更值得注意的是：主要污染狀況都是出現在秋季，次爲春季。但是，即使是在冬季，當全國其他測站均少出現高臭氧污染狀態時，橋頭、左營、屏東與潮州均曾出現10次以上的高污染狀態。

總而言之，台灣地區除東部外，確實有嚴重的光化污染現象，特別是在高屏地區，其次是北部地區，然後是中部地區，桃竹苗區，以及雲嘉南區（分區請參考圖一）。值得注意的是，台灣西部由萬里到恆春，幾乎是每一個測站都曾出現小時臭氧濃度大於120ppbv的情形，甚至如萬里濱海站、陽明山背景站、美濃山區、恆春旅遊區等等，均出現過高污染狀況，這個現象顯示臭氧光化污染的廣泛性、嚴重性與對人體健康的潛在危害性。另外，目前這些測站多數都是位於人口集中的平地，而非位於山區。但是空氣是持續在流動的，臭氧的光化反應過程在白日更是不斷地在

進行著。可以想像得到，位於平地下風處的山區內，森林地帶自然生態系統受到大範圍臭氧污染的威脅，應是相當惡劣。

表一、1993年7～12月與1994年1～12月之臭氧＞120ppbv之小時數與最大濃度(ppbv)之分析

	編號	代號		臭氧＞120ppbv 之小時數 1993 7-12	1994 1-12	總和	春季	夏季	秋季	冬季	最大濃度(ppbv) 1993 7-12	1994 1-12
	1	NA	陽明	2	6	8	3	3	2	0	144	141
	2	NB	萬里	9	26	35	3	27	5	0	145	159
	3	NC	淡水	0	0	0	0	0	0	0	119	116
北	4	ND	仁愛	2	5	7	0	7	0	0	125	137
	5	NE	士林	2	3	5	0	3	2	0	136	162
	6	NF	林口	1	1	2	1	1	0	0	146	121
	7	NG	汐止	14	2	16	0	15	1	0	185	127
	8	NH	蔡寮	1	5	6	1	4	1	0	130	147
	9	NI	大同	0	0	0	0	0	0	0	-	-
	10	NJ	中山	2	8	10	2	5	3	0	125	152
	11	NK	松山	7	18	25	5	16	4	0	190	166
	12	NL	新莊	4	5	9	2	4	2	1	152	141
	13	NM	萬華	3	25	28	9	15	4	0	156	169
部	14	NN	古亭	4	18	22	6	15	1	0	181	200
	15	NO	板橋	11	13	24	4	15	5	0	162	163
	16	NP	士城	8	35	43	11	19	12	1	169	216
	17	NQ	新店	5	24	29	7	18	3	1	152	207
	18	TA	大園	4	0	4	0	0	4	0	141	115
桃	19	TB	觀音	6	3	9	0	1	8	0	137	123
	20	TC	桃園	3	2	5	0	5	0	0	126	136
	21	TD	五權	1	1	2	1	1	0	0	135	124
	22	TE	湖口	0	2	2	1	0	1	0	105	128
竹	23	TF	龍潭	5	14	19	3	7	9	0	126	153
	24	TG	新竹	0	0	0	0	0	0	0	112	119
	25	TH	竹東	2	8	10	1	3	6	0	129	132
	26	TI	頭份	0	0	0	0	0	0	0	-	-
苗	27	TJ	苗栗	2	16	18	12	3	3	0	129	148
	28	TK	三義	10	2	12	0	1	11	0	139	126
	29	CA	豐原	10	12	22	4	3	15	0	139	140
	30	CB	沙鹿	6	0	6	0	0	6	0	136	116
中	31	CC	西屯	5	9	14	2	1	11	0	146	133
	32	CD	忠明	8	3	11	0	0	10	1	148	131
	33	CE	線西	0	0	0	0	0	0	0	-	-
	34	CF	大里	6	3	9	0	0	9	0	138	128
部	35	CG	彰化	1	0	1	0	0	1	0	125	115
	36	CH	二林	0	0	0	0	0	0	0	117	112
	37	CI	南投	9	17	26	1	0	25	0	156	132

(下頁續)

表一、1993年7～12月與1994年1～12月之臭氧＞120ppbv之小時數與最大濃度(ppbv)之分析(續)

	編號	代號		臭氧＞120ppbv 之小時數 1993 7-12	1994 1-12	總和	春季	夏季	秋季	冬季	最大濃度(ppbv) 1993 7-12	1994 1-12
	38	SA	崑崙	0	0	0	0	0	0	0	111	105
雲	39	SB	斗六	1	0	1	0	0	1	0	121	119
	40	SC	台西	2	5	7	1	0	6	0	126	137
	41	SD	新港	1	2	3	0	0	3	0	121	125
嘉	42	SE	嘉義	1	2	3	0	0	4	0	124	136
	43	SF	朴子	1	5	6	0	0	6	0	121	154
	44	SG	新營	5	1	6	1	0	5	0	144	123
南	45	SH	善化	5	3	8	1	0	6	1	132	141
	46	SI	安南	0	6	6	3	0	2	1	120	130
	47	SJ	後甲	2	10	12	2	0	7	3	160	147
	48	KA	美濃	12	14	26	7	1	15	3	154	177
	49	KB	橋頭	16	22	38	6	2	20	10	151	159
	50	KC	楠梓	7	16	23	5	1	13	4	149	143
	51	KD	仁武	3	5	8	0	1	5	2	139	141
高	52	KE	左營	33	36	69	6	4	47	12	158	162
	53	KF	屏東	49	85	134	32	8	78	16	207	182
	54	KG	三民	6	12	18	5	4	7	2	138	197
	55	KH	前金	1	10	11	3	2	4	2	124	166
	56	KI	鳳山	6	8	14	3	5	4	2	146	143
	57	KJ	前鎮	0	0	0	0	0	0	0	-	-
屏	58	KK	大寮	9	13	22	1	3	18	0	151	135
	59	KL	小港	3	13	16	3	1	11	1	129	149
	60	KM	潮州	20	18	38	3	0	23	12	172	147
	61	KN	林園	59	9	68	0	7	54	7	210	145
	62	KO	恆春	2	9	11	5	1	4	1	146	178
東	63	EA	宜蘭	0	0	0	0	0	0	0	108	113
	64	EB	冬山	0	0	0	0	0	0	0	-	-
	65	EC	花蓮	0	0	0	0	0	0	0	93	92
部	66	ED	台東	0	0	0	0	0	0	0	115	108

在季節的分布上，臭氧污染在北部地區主要出現於夏季，南部地區出現於秋季，這應與氣象環流的季節性變化有關（柳與蘇，1995b），未來應深入探討，以了解其特徵，並作為光化污染預測的參考準則。

2.2 月際變化分析

上一節約略提出北部在夏季，南部在秋季，易出現高污染狀況。圖2a,b,c,d 中分別選擇西部平原上一些具代表性之高臭氧污染測站，以了解各地出現小時濃度大於120ppbv的月際變化情形。

北部地區，萬里、松山、萬華與土城四站為四個代表性測站（圖2a）。萬里站以1994年6月出現12次高臭氧個案為最突出。另外萬里站在4、5、6、7、8、9、10與11月均會出現高污染狀態，松山與萬華二站

之月際變化與萬里類似。土城則由2月至11月均可能出現高濃度臭氧。1994年7月台灣颱風與豪雨頻繁，所以臭氧污染不明顯，但是6月確實是明顯的高污染月份。

桃竹苗區，龍潭、竹東、苗栗與三義四站爲代表測站。其中苗栗站在1994年5月出現11次高臭氧個案爲最突出。苗栗在4、5、6、7與9月會出現污染個案。龍潭則在1994年6月出現5次，另外5、6、7與9月會出現高臭氧濃度。竹東則在5、6、7、9與10月，三義在6、9、10與11月等會出現臭氧污染嚴重個案。值得注意的是：7、8月夏季似乎並非桃竹苗區出現臭氧污染的季節。

中部地區，豐原、忠明、南投與後甲爲代表性測站。其中南投在1994年10月出現9次高臭氧個案爲最突出。南投站主要在5、9、10與11月會出現污染個案；忠明站在9、10、11與12月；豐原站在5、6、9、10與11月；後甲站在5、10、11、12與1月等會出現高臭氧濃度。可以看出，中部地區以5、6月和9、10、11月爲主要臭氧污染月份。

高屏地區，以屏東、左營、潮州、橋頭與美濃爲代表測站。其中以屏東站在1993年10月出現33次臭氧污染個案爲最突出。大致上一年12個月份內各站都可以出現1次以上的個案，但是仍以4、5月和9、10、11月爲最顯著的月份。

以上討論主要强調就月份而言，台灣西部地區幾乎在任何一個月份，即使在最寒冷的1、2月份內，都可以出現小時臭氧濃度大於120ppbv的污染狀況。由於各地區的氣候變化是最主要影響臭氧污染的季節性變化因素，因此要解釋北部在6、7、8月，南部在4、5、6與9、10、11月等易出現高臭氧污染的背景原因，就必須由分析各地氣象資料來著手，此點在柳與蘇（1995b）中，將有所說明。

2.3 化學特性分析

在Liu and Young（1995）中，吾人分析環保署過去19個測站資料，指出台灣地區臭氧濃度由北往南增加，同時臭氧先驅物質NO則由南往北增加，二者間呈現明顯之負相關。同時NO_2/NO愈大者（大於1），臭氧濃度愈大。換言之，NO2/NO愈大，即表示光化反應充分，遠離污染源，所以NO濃度低，臭氧濃度高。

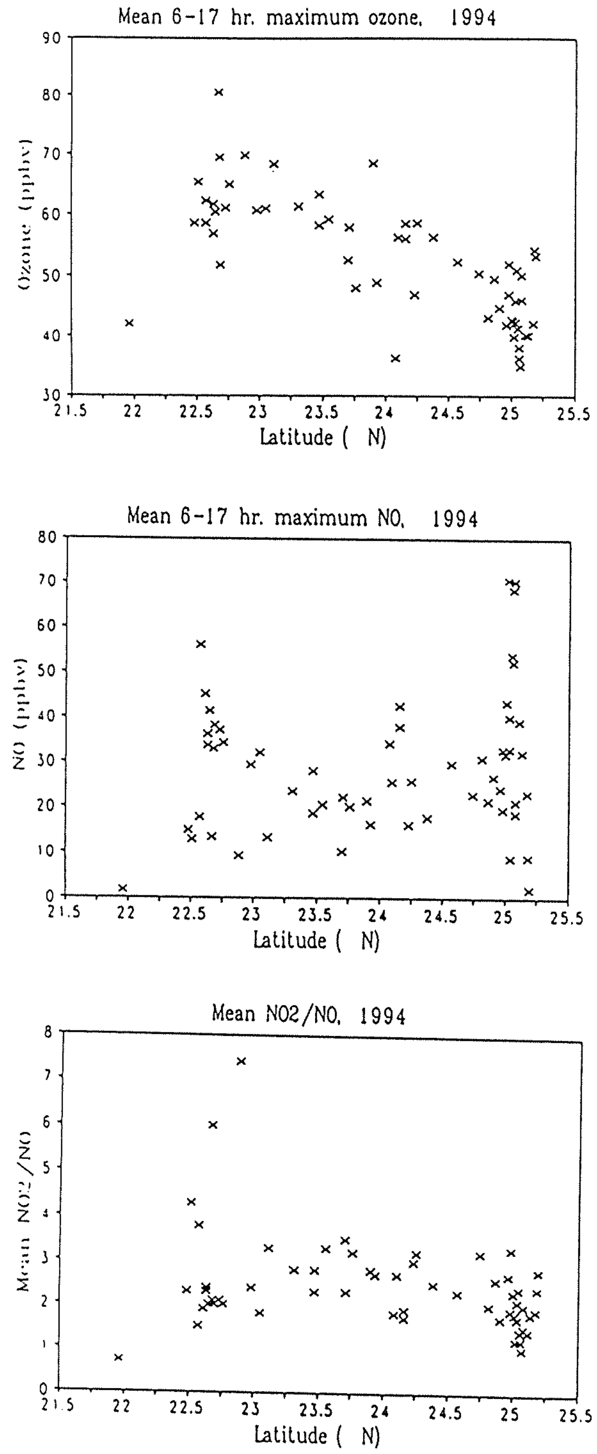
本節分析1994年之62個新測站臭氧濃度資料（除了東部的4個測站資料）；並取各站每日6-17時之最大臭氧濃度的年平均值，代表當地臭氧光化污染狀況。再取各站6-17時之最大NO濃度的年平均值，代表所測污染源特性資料。同時取各站NO_2/NO之年平均值，代表NO自污染源釋放後，經光化反應後的狀態。

圖2a顯示6-17時最大臭氧濃度之年平均值隨緯度的變化情形，明顯地，平均最大臭氧濃度由北向南增加（若忽略恆春資料）。若以平均值來討論，差距約在20ppbv以上。至於年平均6-17時最大NO濃度（圖2b），雖然最大值72ppbv出現在北部，但是南部地區亦有58ppbv的高濃度。大略上，目前測站所測之NO濃度，已無過去明顯之由南往北增加的現象。其原因可由年平均NO_2/NO值看出（圖2c），幾乎每一站之NO_2/NO值均在1以上，甚至達到7.5。倒是恆春站，因爲NO與NO_2均低，所以反而小於1。

進一步分析O3與NO的相關（圖3a），以及O3與NO_2/NO的相關（圖3b），可以發現測站之NO濃度愈高，O_3濃度愈低，也即二者間具負相關。同時測站之NO_2/NO比值愈高，O_3濃度愈高，也即二者間具正相關。換言之，目前的測站較過去的19個測站，在掌握光化污染的現象上，非常符合大氣化學之光化理論特性。

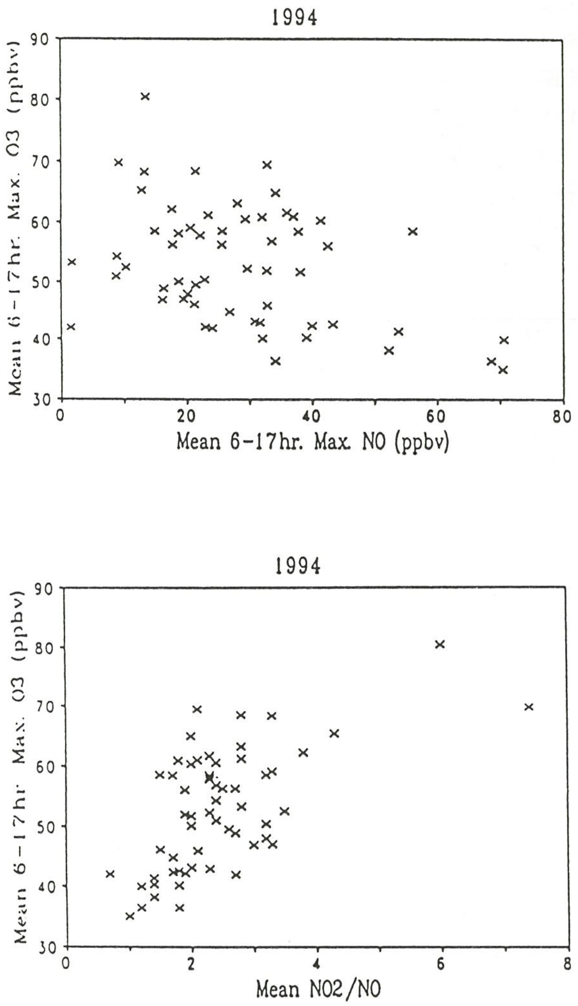
三、嚴重污染個案分析

本文選擇數個具代表性之嚴重光化污染個案，以了解臭氧濃度之時空變化特性，以及與氣象環流之相關。



圖二：1994年台灣西部各測站之年平均每日6-17時最大（a）臭氧濃度與（b）NO濃度，以及（c）年平均NO_2/NO比值之緯度變化圖

台灣省農業試驗所藏書



圖三：1994年台灣西部各測站之年平均每日6-17時最大臭氧濃度與(a）年平均每日6-17時最大NO濃度，與（b）年平均NO_2/NO 比值之相關圖

3.1南部高屏地區 - 1993年10月27～29日

秋季時南部高屏地區臭氧光化污染嚴重，以1993年10月27~29日爲例，左營、屏東、大寮、小港、潮州、林園等測站均測到多次小時臭氧濃度超過120ppbv的情形，最高濃度出現在10月28日屏東午時153.6 ppbv。最高濃度多出現在12～14時之間，且以單尖峰型爲主要日變化型態。

將66個測站資料加以整理，可以繪出臭氧空間分佈情形，圖4特別將10月27～30日14時之地面臭氧空間分布圖繪出，吾人可以明顯地看出高臭氧濃度集中出現在南部地區的情形，與其他地區（特別是北、東部）的低濃度狀況。顯示這種空間分佈情形，應與大氣環流狀態有關。

圖四：1994年(a)10月27日14時、(b)10月28日14時、(c)10月29日14時、(d)10月30日14時之台灣全島臭氧濃度分佈圖

分析這數日的綜觀天氣資料，可以發現在這數日內有一乾冷鋒面南下，27日時在華南地區，28日已到達台北北部（圖5a）。不過，雲雨主要出現在北、東部，無法達中、南部，雖然30日後中南部已有雲層出現。以28日爲例，當日南部陽光充足，海陸環流明顯，不過風速不强。圖5b、c、d顯示整個台灣地區盛行風似乎都不明顯，反而是在14時海風由海洋吹入內陸的現象，非常明顯。這也就解釋爲何最高臭氧濃度出現在14時之前。因爲14時後，穩定的海風能將污染物持續輸入山區內陸地帶，所以臭氧濃度就開始急速下降。很可惜我國在深山地區測站資料少，否則可以了解山區出現高臭氧濃度時間是否會延後，且濃度是否會較平地爲高。

3.2 北部地區－1994年6月24日

夏季時北部地區臭氧光化污染嚴重，以1994年6月24日爲例，松山、古亭、板橋、土城、新店等多數測站均測到午時臭氧濃度超過120ppbv的情形，古亭與土城之午時濃度更已超越200ppbv，甚至如北部濱海測站萬里之午時濃度亦達170ppbv。圖8a顯示大台北盆地當日14時臭氧污染嚴重的景況。

綜觀環境顯示當日台灣位於鋒前暖區（圖6b），同時西南方輕度颱風接近，東方太平洋高壓强盛，台灣地區盛行風不强，但下沈氣流明顯，而致豔陽高照。圖9a、b、c顯示海陸風環流明顯，但是風速並不强盛。這樣的情形約持續到25日。

3.3 西部地區－1994年10月2～5日

秋季是我國最易出現高臭氧污染的季節，一般均以中、南部爲主要發生地區。因爲秋季時東北季風强盛，北部易出現盛行風强與雲雨狀態，中南部反而因中央山脈的阻擋，而致水汽少、晴朗、盛行風不明顯。不過，在1994年10月2～5日期間，台灣地區臭氧污染狀態持續出現，且不僅出現在中、南部，亦出現在桃竹苗區與部份北部地區測站，譬如龍潭、豐原、西屯、南投等地，並全以單尖峰型態爲主要日變化特徵，也即高臭氧濃度主要出現在12-14時，臭氧濃度可達近160ppbv（龍潭）。若將14時臭氧濃度繪出，可以了解西部地區在這數日內，午時臭氧光化污染嚴重的狀況（圖7）。特別是在10月3日14時，O_3濃度超越100或120ppbv的區域，可說是由北往南，包括整個西部地區人口集中地區。

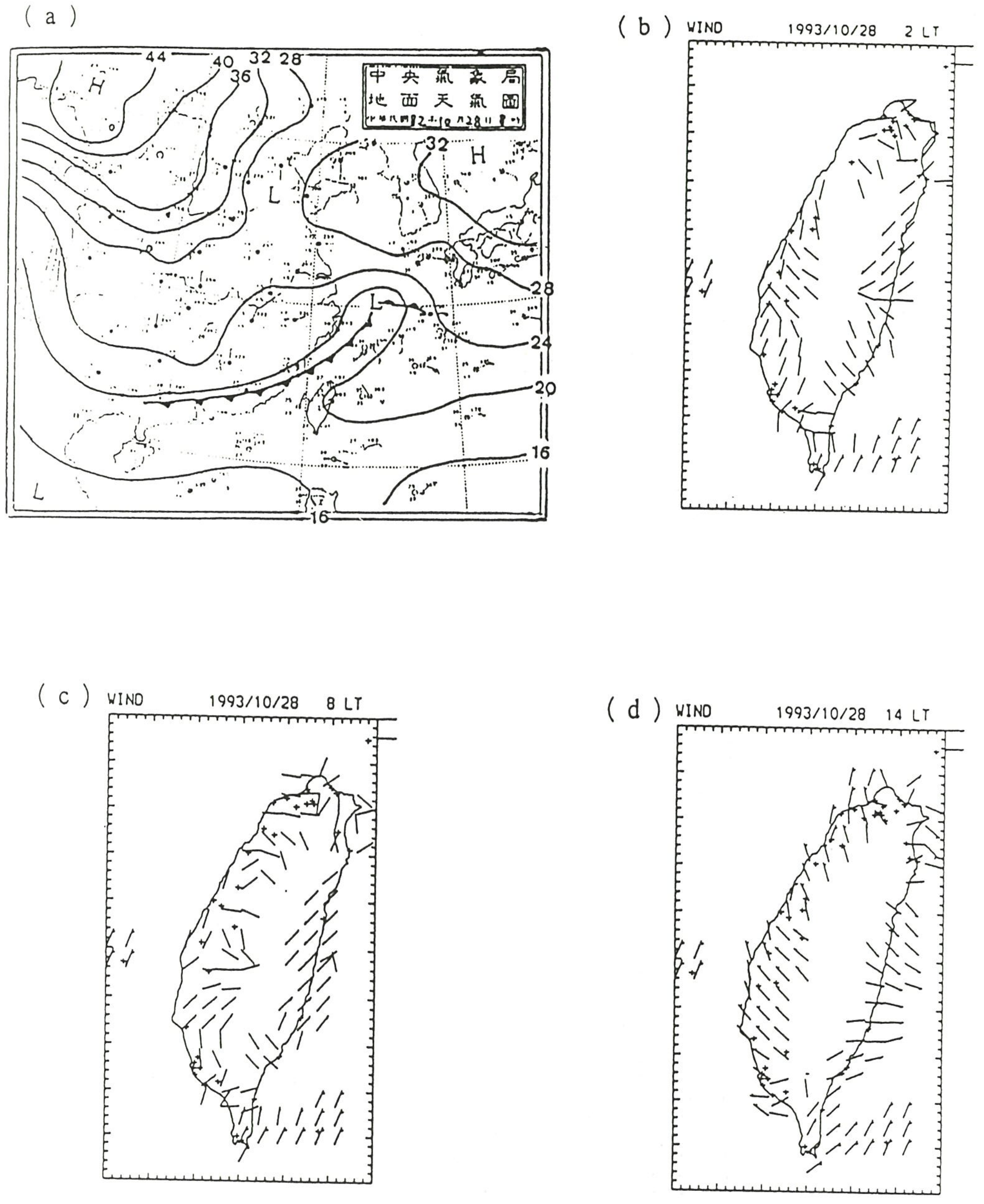
在這段期間內，大陸冷高壓逐漸增强，但是太平洋高壓也未完全撤離對台灣地區的影響，以10月3日爲例，圖8a顯示滯留鋒面停留在華中、華南一帶，台灣地區可謂是盛行風弱，且下沈氣流明顯。詳細之當日近地面氣流，已繪於圖8b、c、d。大致上，盛行風爲東風（澎佳嶼測站資料），不過風速小於2.5 m/s。沿西部平原，清晨陸風與午時海風的熱力環流現象非常明顯。

3.4 中部地區－1994年10月7～8日

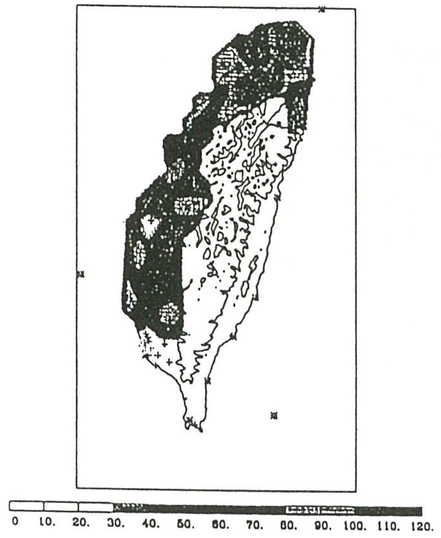
以上三節內，吾人分別介紹南部高屏地區，北部地區，與西部地區出現高臭氧污染個案的狀況。另外，中部與雲嘉南地區亦可能單獨發生嚴重污染的狀況，不過，卻是在東南方颱風系統逐漸北上接近台灣之時。

在1994年10月7與8日，中部與雲嘉南區的豐原、西屯、忠明、南投、斗六等測站均發生臭氧濃度大於120ppbv的情況，不過最高濃度才約124ppbv。另外，圖9a、b顯示O_3濃度大於110ppbv的區域，主要在中部地區。

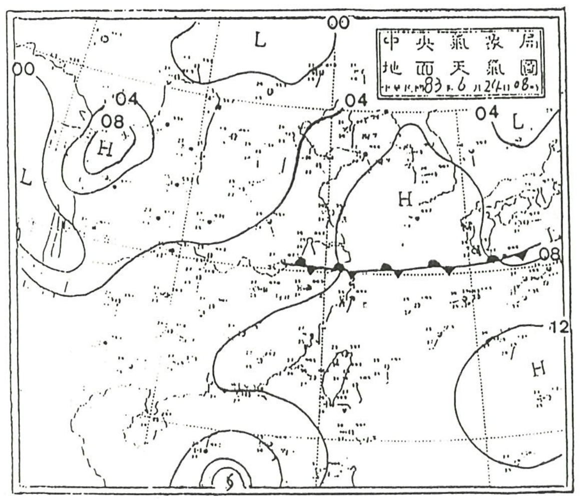
分析當時的綜觀天氣資料，圖9c、d顯示中度颱風席斯由菲律賓東方洋面迅速向西北方接近台灣，此時台灣北、東與南部均受其風場影響，但是中部與雲嘉南地區，卻受中央山脈保護，與颱風前緣下沈氣流影響，所以風速微弱，水汽少，且晴朗無雲。分析顯示10月8日盛行風應爲東北東風（澎佳嶼測站資料），不過在中央山脈西側，風速微弱，反致海陸環流明顯，這對臭氧累積非常有利。



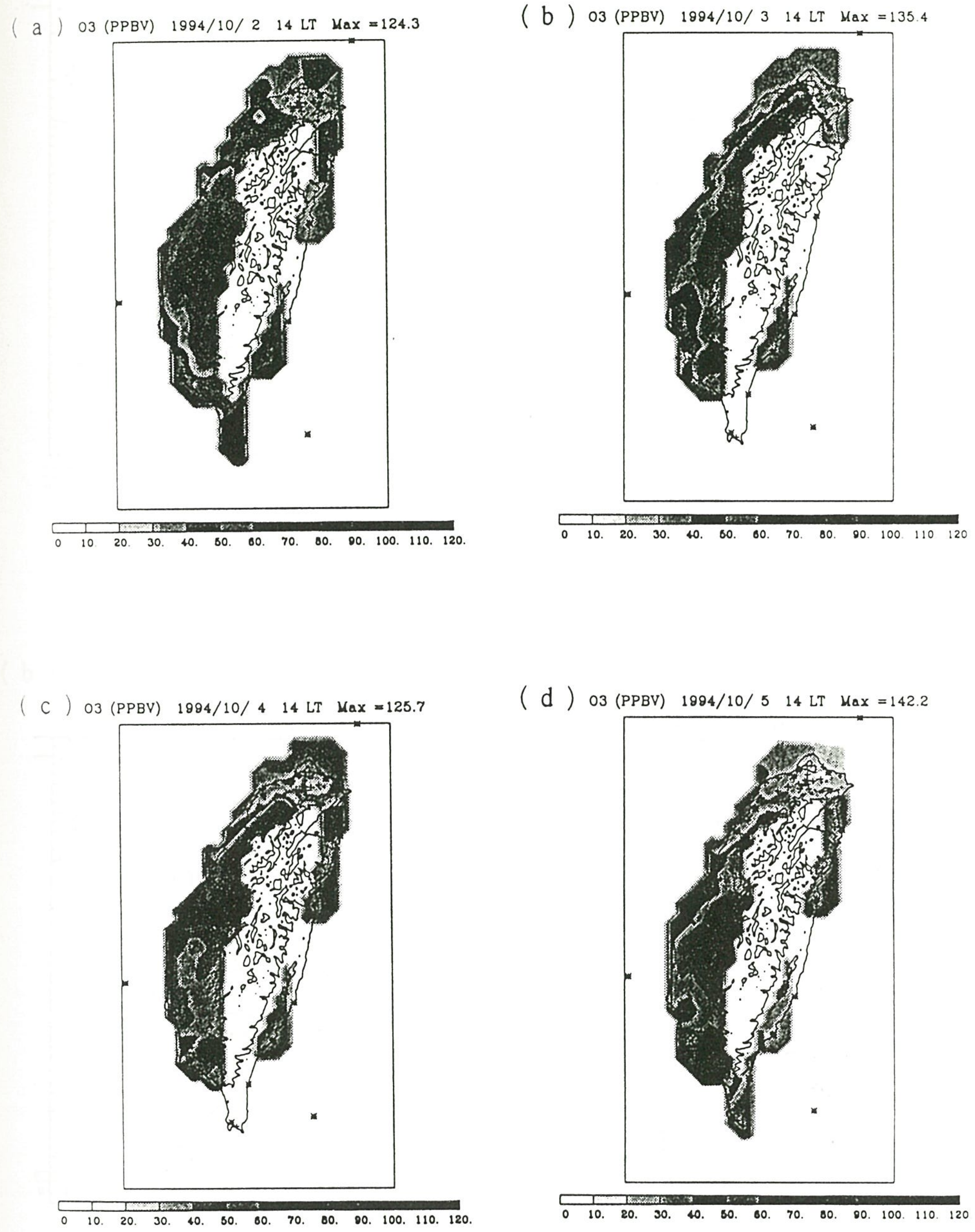
圖五：1993年10月28日(a)8時地面天氣圖，(b)2時、(c)8時與(d)14時之地面風場圖



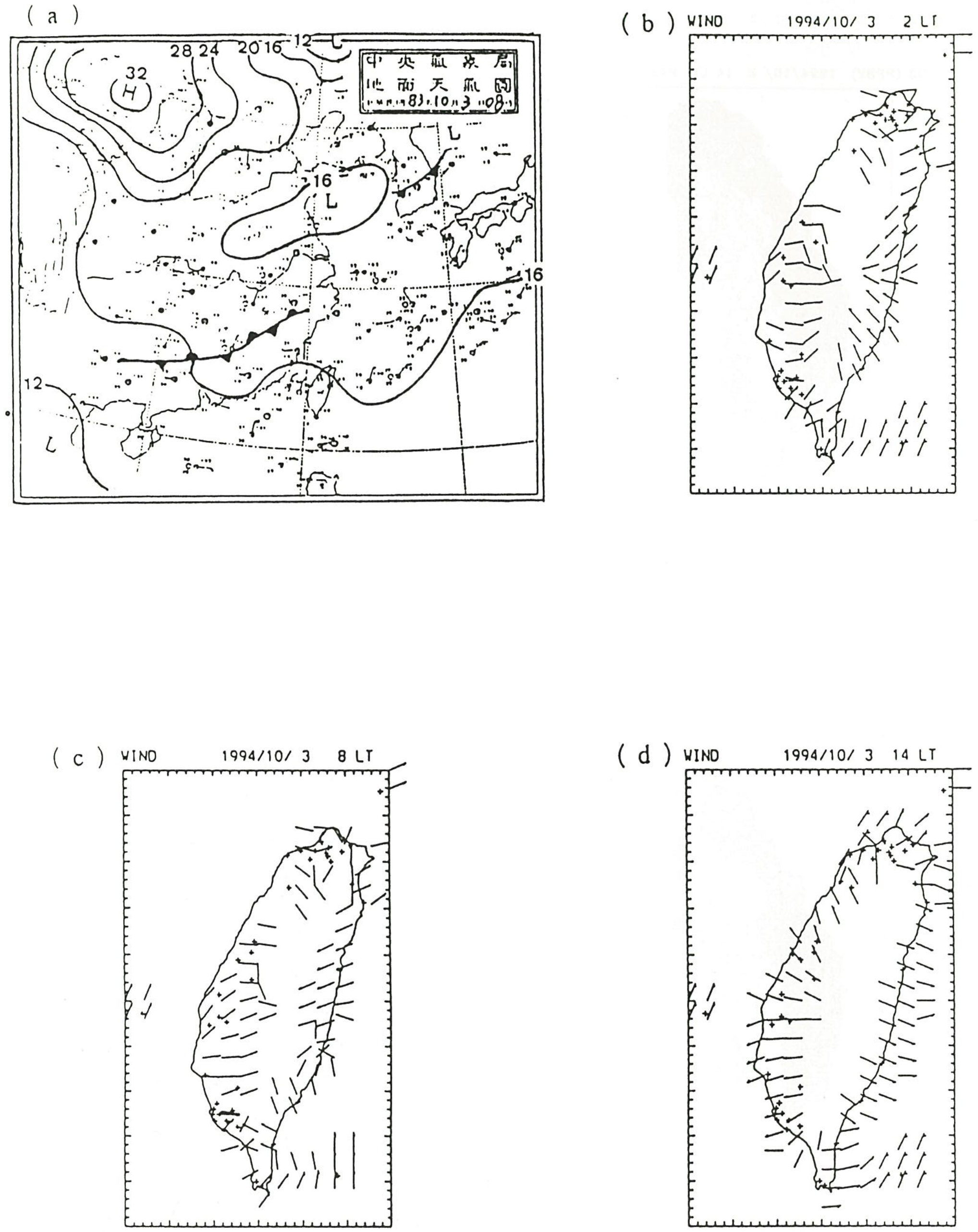
(b)



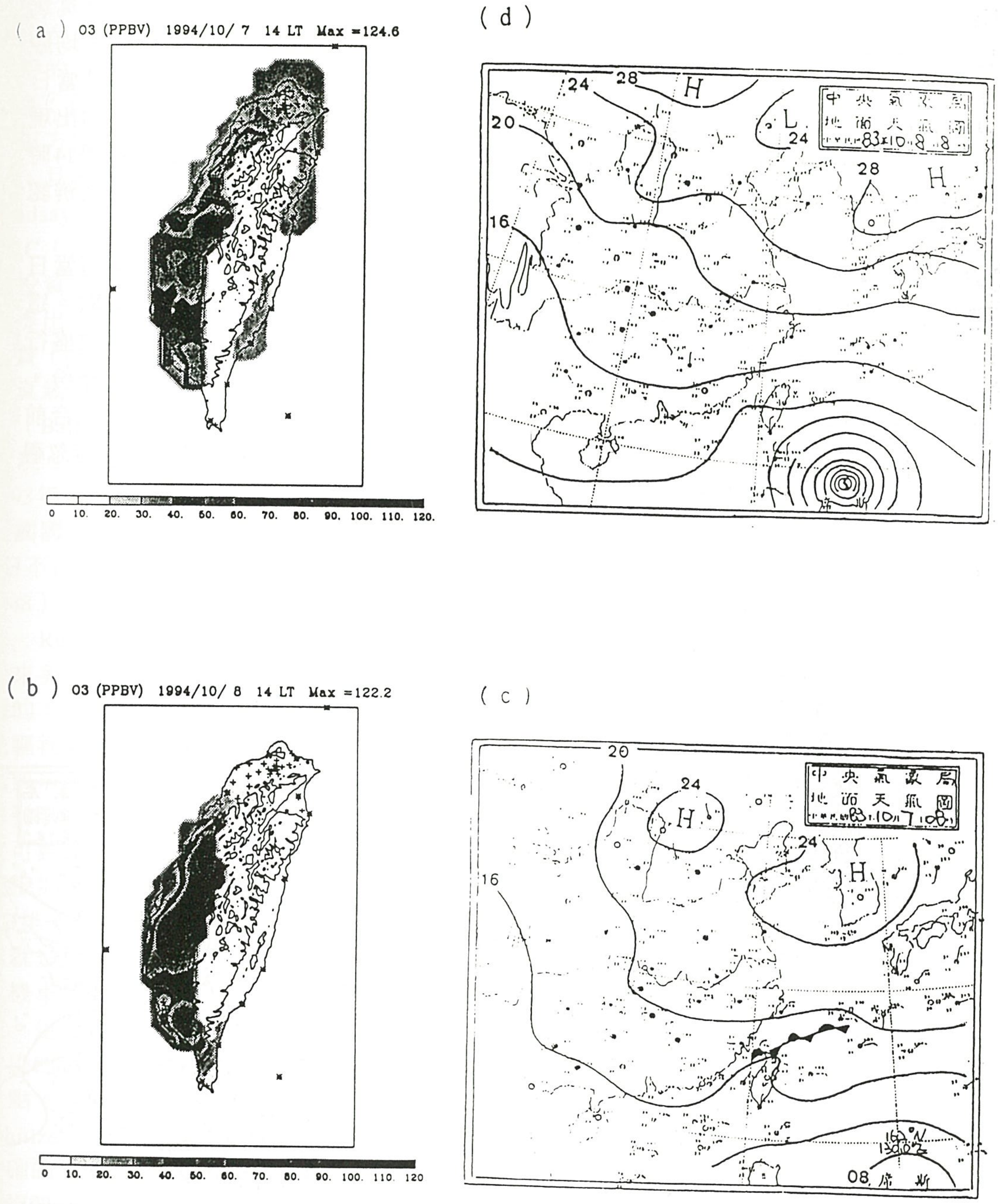
圖六：1994年6月24日(a)14時之台灣全島臭氧濃度分佈圖，(b)8時之地面天氣圖



圖七：1994(a)10月2日14時(b)10月3月14時(c)10月4日14時(d)10月5日14時
之台灣全島臭氧濃度分佈圖。



圖八：1994年10月3日(a)8時地面天氣圖，(b)2時、(c)8時與(d)14時之地面風場圖



圖九：1994年(a)10月7日14時(b)10月8日14時之台灣全島臭氧濃度分佈圖，
與(c)10月7日8時(d)10月8日8時之地面天氣圖

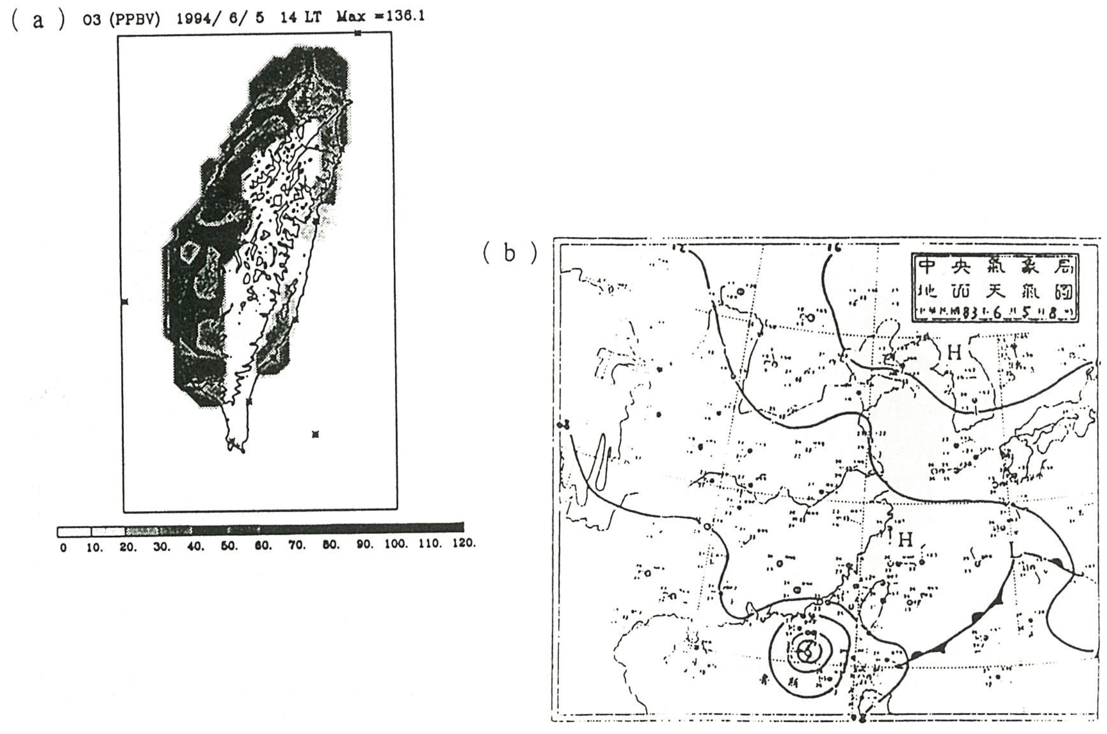
3.5 桃竹苗區－1994年6月5日

夏、秋季颱風接近台灣，其前緣之下沈氣流配合中央山脈阻擋盛行風向，經常會造成台灣某些特定地區盛行風弱、水汽少、無雲與日照強盛，而致光化污染明顯。1994年6月5日桃竹苗區臭氧光化污染明顯（圖10a），三義、豐原、西屯、忠明等站之午時臭氧濃度均超過120ppbv，最高濃度可達136ppbv（苗栗、豐原、西屯）。當時之情形爲輕度颱風魯斯位於台灣西南（圖10b），不過顯然只對台灣南部、東部與北部之天氣有明顯影響。分析顯示盛行風爲東南風（澎佳嶼測站資料），不過風速仍在2.5m/s以下，桃竹苗區風向微弱與風速低，顯然是盛行風受到地形干擾之故。

3.6 結論

本文分別選擇南部高屏地區、北部、西部地區、中部與桃竹苗區出現高臭氧光化污染個案，進行分析。大致上，均顯示單尖峰臭氧日變化型態，爲各測站當日之主要臭氧濃度變化型態。高濃度約出現於12-14時之間。另外，本文也顯示將14時臭氧濃度空間分佈圖繪出，可以作爲辨認污染分佈型態之主要依據。

氣象環流的分析，顯示污染區當日之盛行風均很微弱，且海陸環流明顯。這均顯示地形阻擋盛行風的效應，而致盛行風速低、水汽少、雲層稀薄、陽光充份，光化效應明顯。特別是颱風接近，配合前緣下沈氣流所可能造成的影響，實不容忽視。



圖十：1994年6月5日(a)14時之台灣全島臭氧濃度分布圖，與(b)8時之地面天氣圖

四、討論與建議

4.1 污染源排放控制策略探討

台灣光化污染嚴重的狀況，確實是個不爭的事實。未來吾人應加强研究的重點當是：預報、模擬與長期控制策略之研究。在這方面美國應可說是投資經費與人力最多，且執行相關計劃最久的國家。但是，Lindsay et al.（1989）, Schulze（1993）與NRC（1991）就指出，美國長期數十億美元的投資，在西岸、東岸等許多重要都市，所提出之控制策略，如持續減少臭氧先驅物質（precursor）的排放，仍是無法有效抑制臭氧濃度的累積。譬如馬利蘭州巴提摩市（Baltimore）1983～1993年間就有222日出現小時O_3濃度大於120ppbv的情形，1993年一年內出現18次（Ryan, 1995）。而美國國家標準要求連續三年內絕不可出現4日不合標準的情形 (Lindsay and Chameides, 1988）！

Russell et al.（1995）特別指出，長期以來美國臭氧光化污染的控制策略是有問題的。首先，要控制臭氧，似乎就應控制先驅物質NO與VOC，但是NO是空氣中的氮與氧在高溫下反應生成，而要改善汽機車引擎的設計以減少NO的排放，其投資必定可觀，成效卻不一定明顯。因此除非是直接抑制汽機車的數量，否則是很難進行NO排放總量的控制。所以，比較可行的方式就是改善引擎與廢氣排放的設計，使得汽機車燃料經充分燃燒，以減少VOC的排放。這所以，長期以來美國對於光化煙霧污染的控制，是以抑制VOC的排放總量爲重點。但是Seinfeld (1989)、NRC (1991)、Schulze（1993）等均指出這個觀點是有待商確的，因爲NO與VOC光化反應生成臭氧的相關性，是非線性的（Lin et al., 1988），單純地減少其中一個的總量，並不保証臭氧濃度的降低。

另外，Russell et al.（1995）更指出VOC中的成分組合，可以因爲排放源特性的不同而不同，有些碳氫化合物如烯族、醛類等生成臭氧的效率，較烷族爲佳，因此若果能改變VOC的組合成分，使其中反應性差的成分增多，而反應性佳的成分減少，將更能抑制臭氧的生成。Russell et al.（1995）利用箱型光化模式，模擬試驗其所提出之假設，獲致結論爲：控制VOC成分組合的抑制策略較直接控制VOC總量的策略，能達到一倍以上的效益。

柳等（1994）就曾探究台北都會區的VOC成份，發現我國汽油中填加苯的含量較高，所以苯與甲苯所佔比例均較國外爲大。另外，空氣中正、反丁烯所佔的比例也遠較國外爲大，雖然吾人並無法辨明其來源。可是由於正、反丁烯或甲苯與OH的反應速率極高，所以台北組成的反應活性約爲洛杉磯（LA）組成的1.6倍。柳等（1994）利用箱型光化模式，發現在相同的初始環境下，台北VOC組成較LA組成能造成午時最高O_3濃度，增加約1.3～2.5倍。這個發現基本上與國外最近的見解密切配合。

未來我國當可繼續加强上述的研究，特別是應進行都會地區VOC組成成份分析，以及VOC排放源特徵調查等，以了解VOC組成成分對臭氧生成的影響，更進而提出明確的組成控制策略。

4.2 光化污染預測探討

國際間對光化污染潛勢預報的研究，仍以美國加州地區的成就最爲驚人（Cassmassi, 1987），目前該區每日均能對次日逐時的臭氧濃度變化提出預測。另外日本東京地區亦訂定出詳細的預報準則。大致上，二者均以氣象環境的掌握，配合長期監測資料之統計分析，作爲預報的依據。

我國有關光化污染預測的研究，過去主要都以大台北地區爲研究對象，曠與張（1994）分析1987-1989年夏季的空氣品質資料，指出四類易於造成台北光化污染的綜觀天氣型態，分別爲熱帶海洋性季風消退型、兩梅雨鋒之間型、高壓出海迴流型，

以及颱風過境、低壓或冷鋒接近型。曠與張（1994）並提出微弱西南風或東南風，爲二個主要造成大台北光化污染的盛行風場狀態。

Liu et al.（1994a）延續Liu et al.（1990）與Liu（1990）的研究，分析1986-1989年資料，指出7種易於造成台北光化污染的綜觀天氣型態。分別爲：

(一) 移動高壓籠罩：大陸高壓中心位於30衹以南，中國大陸邊緣，向東南方東海地區移動時。

(二) 副熱帶高壓控制：太平洋高壓向西延伸，台灣地區受高壓脊所控制。

(三) 台灣位於鋒前暖區時。

(四) 位於低壓帶之間，如ITCZ（間熱帶輻合區）北移至台灣附近時。

(五) 高壓迴流：此時大陸高壓中心位於30衹以北，黃海上空。

(六) 台灣位於具密集壓力梯度之大陸高壓系統之邊緣時，此時高壓中心在大陸北方，密集等壓線位於長江以北，台灣地區位於高壓外緣，盛行風速微弱。

(七) 弱東北季風：大陸高壓系統近似滯留於30衹以北，台灣受弱東北季風影響。

大致上，夏季時第2、3、5類天氣型態最常發生。Liu et al.（1994a）指出若使用上述7種天氣類型作爲光化污染預測的指標，約具54.5％的成功率。其次則應依據次日地面天氣預測的狀況，作進一步修正，估計預測成效可達75％以上。Liu et al. (1994a) 所建議之預測程序爲：

1. 次日綜觀類型天氣辨認，以找出符合上述7類之一的天氣特徵。
2. 刪除預測次日陰雲，甚至降雨的個案。
3. 特別注意次日最高與最低氣溫差距達5蚓以上者。
4. 當日上午8時之氣溫與午時最高氣溫預測值差距在4蚓以上者。這個現象無論出現在哪一個季節，都是表示陽光旺盛，熱力環境會影響區域性氣流發展。
5. 當日上午8、9時風速平均小於1.5m/s者。

此現象說明空氣滯留狀態。對光化污染而言，清晨陸風與午後海風間的轉換，會出現短暫的滯留狀態，配合晴朗無雲，就足以讓臭氧生成與累積達國家標準之上（柳與蘇, 1995b）。當然，若果能在事前就獲得這項氣象因子之預報數據，將更有利於預報成效之掌握。

上述的預報準則建議，僅適用於北部地區，並不適用於中、南部。因爲中南部高臭氧光化污染發生的時機與北部地區並不一致。此點在本文中已一再强調。

未來我國當更進一步加强上述的研究，特別是分區辨認綜觀氣象環境對區域環流的影響，以找出適合不同區域之光化污染發展狀況，並據以建立定性預報準則。其次，吾人當充分運用66個空氣品質監測資料，採用Ryan（1995）所强調之統計分析方法，建立定量預報模式。

4.3 整體性建議

前兩節的討論，主要强調污染源控制策略與光化污染預測的重要性。但就一個整體架構來看，全方位的光化污染問題研究（Pederson et al.,1995）應包含以下重點：

(1) 污染源排氣之碳氫化合物組合研究，包括：

《a》個別污染源調查。

《b》城市大氣之碳氫化合物組合分析，如柳等（1994）。

《c》碳氫化合物組合改變，對城市光化污染之影響分析：主要依據數值模擬或光化煙霧實驗，如柳等（1994）、Liu et al.（1994b）、Fujita et al.（1995）。

《d》污染源（特別是汽、機車）排氣之碳氫化合物組合控制：就國內之科技水準而言，吾人僅能充分收集國外相關資訊，以供後續有關控制策略設計時之參考。

《e》森林排放碳氫化合物組合與總量調查：自然排放之VOC對大範圍臭氧光化污染之生成，異常重要。（Arey et al., 1995）

(2) 臭氧光化污染之氣候統計分析，包括：

《a》臭氧光化污染之季節性與空間性變化。

《b》綜觀天氣型態對不同區域之光化污染發展探討。（Ludwig et al., 1995）

《c》光化污染事件發生時之臭氧濃度與其他氣象或大氣化學因子之統計相關模式建立。

(3) 光化污染事件（Episode）之預測，包括：

《a》定性預報準則之建立。

《b》定量預報模式之建立。

(4) 長程傳送之研究，包括：

《a》光化污染事件發生時上游污染源之辨認。

此問題需仔細澄清。基本上，光化污染的發生，乃是一次污染物NO與VOC，經充分光化反應後，才會在午時出現臭氧高濃度狀態。因此，高污染出現地點（receptor），不一定是高污染排放源（source）。以台灣北部萬里濱海測站爲例，每年暑假都會出現臭氧污染事件，簡單的氣流傳送分析，可以了解臭氧前驅物質NO與VOC，應是來自台北地區。入夜後的陸風將污染物輸送至海洋上，盛行的西南風再配合午時的海風，就將經充分光化反應生成的臭氧，輸送到台灣西北與北部海岸地區。

《b》飛航與密集氣象環流測量。

收集充分之相關資料，一方面更加了解source-receptor間的關係，另一方面提供數值模擬之驗證使用。Macpherson et al.（1995）

(5) 光化數值模擬之發展，包括：

《a》箱型光化模式，以供概念性控制策略之使用，如柳等（1990）、柳與盧（1991）。

《b》都市區域性光化模式，以供都市區光化污染預測與控制策略之分析，如柳（1992,1993b）、曠與張（1994）等。

《c》台灣區域空氣品質模式，可以鄭與張（1995）的研究成果爲出發點，特別强調台灣地區區域性長程傳送的影響分析。這對污染控制策略的擬定亦有相當協助。

(6) 整體控制策略之思考，包括：

《a》個別污染源控制策略之擬定，譬如汽、機車、油漆行、液態瓦斯站等之管制。

《b》高污染事件之掌握，與短期小區域污染源控制策略之擬定。若能明確訂定出source-receptor的相關性，當預測高污染事件將發生時，可以短期小區域污染源的控制策略達到抑制污染的目標。基本上，這個策略較管制汽機車VOC排放更爲經濟有效（Ryan, 1995）。

《c》控制策略之經濟與健康保護成效評估。

以上本文之整體討論，主要期望國內環保界在推動相關研究與行政工作時，能注意到我國汽、機車持續成長，所造成的二次光化污染問題，已非小區域現象，而是大範圍全島現象。其不僅持續影響人體健康，也對生態環境發展造成相當衝擊。因此基礎學術理論研究與應用工程技術研究，甚至政策控制策略研究，應充分交流合作，以合理利用國內有限之人力與資源，達到預期之整體目標。

誌　謝

本文乃在環保署計劃EPA85-1003-09-15支持期間完成，作者們特別感謝李侃翰先生與李敏瑜小姐之協助。

引用文獻

柳中明，林欣慕，沈世宏，李昌衡，劉紹臣，方淑慧，1990：臭氧光化生成與台北盆地區域性環流。工業污染防治，

33，28-57。
柳中明，盧開新，1991：箱型光化模式之初步發展驗證與應用。大氣科學，19，33-65。
柳中明，1992：一維垂直光化模式之研究與應用。大氣科學，20，119-134。
柳中明，1993a：台灣的臭氧光化污染分析。台灣地區空氣污染與農業氣象對作物生產影響研討會，1993年4月。
柳中明，1993b：水平傳送對大台北地區光化生成臭氧的研究。大氣科學，21，1-22。
柳中明，李清勝，1994：台灣地區空氣品質監測資料分析與空氣品質預報技術探討。環境監測與指標系統研討會，1994年5月31日～6月4日。
柳中明，蔡育文，左台利，羅俊光，劉紹臣，1994：碳氫化合物組合與近地面臭氧生成。大氣科學，22，431-453。
柳中明，蘇維中，1995a：大台北與大高雄地區區域風場與高臭氧生成之相關分析。第三屆海峽兩岸環境保護學術研討會，1995年8月28-31日，中國北京。
柳中明，蘇維中，1995b：區域風場與高臭氧污染之相關。（投稿大氣科學）
曠永銓，張能復，1994：台灣北部夏季光化污染事件之數值模擬研究。中國環保，19，22-29。
鄭福田，張時禹：台灣地區酸雨調查評估與防治之規劃：（二）空氣污染物跨區或跨國輸送與酸雨形成關係之研究。EPA-84-E3F1-09。
Arey, J., D. E. Crowley, M. Crowley, M. Resketo and J. Lester. 1995. Hydrocarbon emissions from natural vegetation in California's South Coast Air Bosin. Atmos. Environ, 29, 2977-2988.
Cassmassi. J. C. 1987. Development of an objective ozone forecast model for the southern coast air basin. 80th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association. New York, 21-26 June 1987.
Fujita, E. M., J. G. Watson, J. C. Chow and Magliano. 1995. Receptor model and emissions in inventory source apportionments of nonmethane organic gases in California's San Joaquin Valley and San Francisco Bay Area. Atmos. Environ, 29, 3019-3036.
Lin, X., M. Trainer and S. C. Liu. 1988. On the nonlinearity of the tropospheric ozone production. J. Geophys. Res., 93, 15879-15888.
Lindsay, R. W. and W. L. Chameides. 1988. High-ozone events in Atlanta, Georgia, in 1983 and 1984. Environ. Sci. Techno1., 22, 426-431.
Lindsay, R. W., J. L. Richardson and W. L. Chameides. 1989. Ozone trends in Atlanta, Georgia: Have emission controls been effective? J. Air Pollut. Control Assoc., 39, 40-43.
Liu, C.M. 1990. A study of the meteorological environment during ozone build-up in Taipei. 3rd Int. Conf. Atmospheric Science and Application to Air Quality (ASAAQ), Shanghai, China, 15-19 October, 1990.
Liu, C.M., S.C. Liu and S.H. Shen. 1990. A study of Taipei ozone problem, Atmos. Environ., 24A, 1461-1472.
Liu, C. M., C. Y. Huang, S. L. Shieh and C. C. Wu. 1994a. Important Meteorological parameters for ozone episodes experienced in Taipei basin. Atmos. Environ., 28, 159-173.
Liu, C.M., Y.-W. Tsay and S. C. Liu. 1994b. A modelling approach to the understanding of the photochemical pollution in Taiwan and control strategies. 7th IUAPPA Regional Conference in Air Pollution and Waste Issues. Nov. 2-4, 1994. Taipei, R.O.C.
Liu, C. M. and C. Y. Young. 1995. An analysis of Taiwan surface ozone (1988-1993). J. Environ. Protection Soc. of R.O.C., 18, 15-30.
Ludwig, F. L., J. -Y. Liang and J. Chen. 1995. Classification of ozone and weather patterns associated with high ozone concentrations in the San Francisco and Monterey Bay Area. Atmos. Environ., 29, 2915-2928.
Macpherson, J. I., R. L. Desjardins, P. H. Schuepp and R. Pearson Jr. 1995. Aircraft-measured ozone deposition in the San Joaquin Valley of California. Atmos. Environ., 29, 3133-3146.
National Research Council. 1991. Rethinking the Ozone Problem in the Urban and Regional Air Pollution. National Academy Press, Washington, D.C.
Pederson, J. R., et al. 1995. California Ozone Deposition Experiment: methods, results and oppertunities. Atmos. Environ., 29, 3115-3132.
Russell, A., J. Milfoed, M. S. Bergin, S. McBride, L. McNair, Y. Yang, W.R. Stockwell and B. Croes. 1995. Urban ozone control and atmospheric reactivity of organic gases. Science, 269, 491-495.
Ryan, W.F. 1995. Forecasting severe ozone episodes in the Baltimore metropolitan area. Atmos. Environ., 29, 2387-2398.
Schulze, R.H. 1993. The 20-year history of the evolution of air pollution control regulation in the U.S.A. Atmos. Environ., 27B, 15-22.
Seinfeld, J. H. 1989. Urban air pollution: State of the science. Science, 243, 745-752.